

Особенности формирования Центрально- и Восточно-Тихоокеанского типов Ла-Нинья*

О. В. Марчукова, Е. Н. Воскресенская

Институт природно-технических систем,
Российская Федерация, 299011, Севастополь, ул. Ленина, 28

Для цитирования: Марчукова, О. В., Воскресенская, Е. Н. (2022). Особенности формирования Центрально- и Восточно-Тихоокеанского типов Ла-Нинья. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (2), 299–317. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.205>

В работе проведен анализ данных спутниковых наблюдений среднемесячной концентрации хлорофилла «А» в экваториальной зоне Тихого океана в годы явления Ла-Нинья, взятых из проекта GlobColour с 1998 по 2019 г., в котором для сбора информации используются такие спутниковые датчики, как SeaWiFS, MODIS, MERIS и др. Исследование полей концентрации хлорофилла проводилось совместно с анализом поверхностных течений и распределения температуры воды на поверхности и по глубине океана из реанализа NCEP GODAS с 1981 по 2019 г. Дополнительно были привлечены индексы пассатных ветров с 1979 по 2019 г. для разных секторов Тихого океана. Работа проводилась с целью изучить механизмы формирования двух разновидностей явления Ла-Нинья, которые приводят к образованию разных климатических аномалий, как в тропиках, так и за их пределами. Обнаружено, что в начальной стадии зарождения Центрально-Тихоокеанского типа Ла-Нинья концентрация хлорофилла в центре экваториальной зоны увеличивается в шесть-восемь раз (с 0.1 мг/м^3 до 0.8 мг/м^3), а глубина залегания термоклина в этом районе уменьшается до 50 м, что свидетельствует об интенсификации центрально-экваториального апвеллинга. При Восточно-Тихоокеанском типе Ла-Нинья апвеллинг на экваторе не образуется, отрицательная аномалия температуры воды на поверхности формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого усилением ветров над восточно-экваториальным районом Тихого океана. Все полученные результаты подтверждены на 95 % на статистически значимом уровне по критерию Стьюдента. Таким образом, в работе продемонстрированы существенные различия в особенностях формирования двух типов Ла-Нинья на их начальной стадии зарождения.

Ключевые слова: типы Ла-Нинья, концентрация хлорофилла, аномалия температуры, термоклин, Тихий океан, пассат, поверхностные течения, экваториальные волны России.

1. Введение

Явление Ла-Нинья представляет собой холодную фазу основного сигнала климатической изменчивости межгодового масштаба Эль-Ниньо — Южное колебание

* Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме № 0012-2021-0007 (121122300072-3) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан — атмосфера и антропогенного воздействия».

(ЭНЮК) (Rasmusson and Carpenter, 1982; Philander, 1990; Webster et al., 1998; Chang et al., 2000; Chen et al., 2013). Этот дальнедействующий сигнал обуславливает формирование региональных аномалий климата на Земле и оказывает влияние на разные аспекты жизни и деятельности человека. К примеру, когда в 2007–2008 гг. фиксировалось явление Ла-Нинья в Тихом океане, на юго-востоке северной Америки наблюдалась сильная засуха (Manuel, 2008). В результате из-за неурожая основных сельскохозяйственных культур фермеры Северной Каролины (США) потеряли около 500 млн долларов. Если при Ла-Нинья на юго-западе Северной Америки возникает засуха, то в Австралии, напротив, выпадают обильные дожди и фиксируются наводнения. В 2010–2011 гг. наблюдались два последовательных Ла-Нинья. При этом 78 % территории Квинсленда (Австралия), площадь которого равна площади Германии и Франции вместе взятых, из-за сильных предшествующих наводнений было объявлено зоной бедствия (Miller, 2019). Изучение условий формирования Ла-Нинья может помочь в развитии методов прогнозирования этих событий, а их заблаговременный прогноз позволит свести к минимуму негативные последствия от таких событий.

Однако прогнозирование Ла-Нинья в настоящее время остается нерешенной научной проблемой, о чем свидетельствуют последние факты: не предсказаны начало и продолжительность Ла-Нинья 1998–2000 гг. (Picaut et al., 2002) и Ла-Нинья 2016–2018 гг. (Feng et al., 2020). Одной из причин неудачных прогнозов является недостаточная изученность особенностей этих событий.

В последнее десятилетие вырос интерес к классификации событий Ла-Нинья (Cai and Cowan, 2009; Shinoda et al., 2013; Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Voskresenskaya and Marchukova, 2017). Большинство авторов отдают предпочтение гипотезе о существовании двух типов холодных эпизодов ЭНЮК — Восточно-Тихоокеанского (ВТ) и Центрально-Тихоокеанского (ЦТ) (Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Voskresenskaya and Marchukova, 2017; Ding et al., 2017). Для ВТ типа Ла-Нинья характерно формирование максимально отрицательной аномалии температуры поверхности океана (ТПО) в восточно-экваториальной части Тихого океана в период зрелой фазы развития самого события, а для ЦТ типа — в центрально-экваториальной (Voskresenskaya and Marchukova, 2017). Однако механизм образования именно двух типов Ла-Нинья не описан ни в одной работе. Поэтому цель настоящего исследования заключается в том, чтобы изучить основные особенности формирования ВТ и ЦТ типов Ла-Нинья.

Из литературных источников известно, что в развитии Ла-Нинья важную роль играют долгопериодные экваториальные волны Россби (ЭВР), или, как их называют в зарубежной литературе — волны тропической неустойчивости (Tropical instability waves). В Тихом океане ЭВР развиваются с июля по декабрь, распространяются в западном направлении с фазовой скоростью 0.4–0.6 м/сек, длиной волны 1000–2000 км и периодом 20–40 дней (Legeckis, 1977; Qiao and Weisberg, 1995; Contreras, 2002). Механизм, порождающий ЭВР, представляет собой смешанную баротропно-бароклинную неустойчивость. На сезонном масштабе ЭВР генерируют горизонтальный перенос тепла к экватору и влияют на тепловой баланс верхнего слоя океана (Baturin and Niiler, 1997; Graham, 2014) и вертикальное перемешивание в восточно-экваториальной части Тихого океана (Menkes et al., 2006). Что касается межгодовой изменчивости, то увеличение меридионального градиента ТПО и уси-

ление течений вблизи восточно-экваториальной части Тихого океана в периоды событий Ла-Нинья сопровождаются более сильной изменчивостью ЭВР (Yu and Liu, 2003). Это создает попеременно направленную циркуляцию вод в вертикальной плоскости вдоль экватора и приводит к перемешиванию холодных глубинных водных масс с теплыми водами на поверхности (Бондаренко и Серых, 2011). Соответственно, ЭВР модулируют амплитуду ЭНЮК и влияют на асимметрию между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, особенно во время явлений Ла-Нинья, которые могут существовать два года подряд (An, 2008; Zhang, 2016). В настоящей работе рассмотрены особенности аномалий фазовых скоростей волн Россби в годы ВТ и ЦТ типов Ла-Нинья.

2. Данные и методы

В работе использовались следующие массивы среднемесячных данных:

- реконструированная ТПО из массивов HadISST (Rayner et al., 2003) и COBE SST2 (Hirahara et al., 2014) с 1870 по 2019 г. с шагом сетки в 1° ;
- направление и значения скоростей течений на глубине 5 м из океанического реанализа NCEP GODAS (Saha et al., 2006) с 1981 по 2019 г. с разрешением сетки $1 \times 1^\circ$ (Psl.noaa.gov, 2021));
- температура воды и значения солености по глубине от 5 до 4000 м из того же реанализа NCEP GODAS;
- концентрация хлорофилла «А» по спутниковым данным SeaWiFS (Cracknell et al., 2001) с разрешением 9 км за период с 1998 по 2010 г.;
- данные спутниковых наблюдений за хлорофиллом с 1998 по 2019 г. из проекта GlobColour (Maritorena et al., 2010) с разрешением 4 км, в которые включены сведения с разных датчиков, таких как SeaWiFS (NASA), MODIS (NASA), MERIS и др. (Hermes.acri.fr, 2021)).

Дополнительно в настоящем исследовании были привлечены среднемесячные значения индексов ветров (TWI), рассчитанные на 850 мб изобарической поверхности для трех районов Тихого океана (рис. 1) — восточного (EP), центрального (CP) и западно-экваториального (WP) — из CPC NOAA с 1979 по 2019 г. (Cpc.ncer.noaa.gov, 2020).

Для выделения событий Ла-Нинья был выбран оптимальный критерий, при котором пороговое значение аномалии ТПО, осредненной в районе Nino3.4 ($5^\circ\text{N} - 5^\circ\text{S}$ и $170^\circ\text{W} - 120^\circ\text{W}$) составило -0.5°C , а минимальная продолжительность

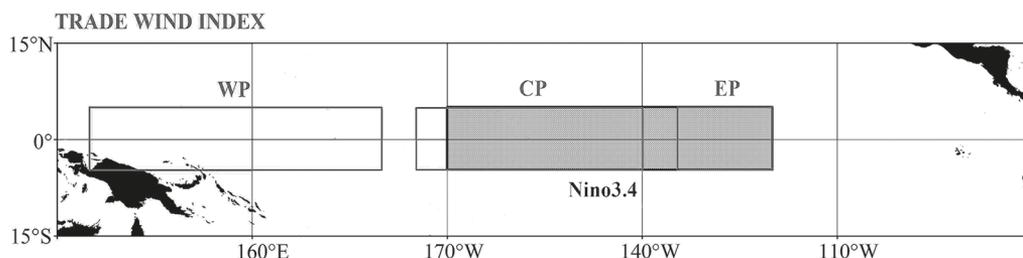


Рис. 1. Районы расчета индексов пассатных ветров в экваториальной части Тихого океана

существования этой аномалии (П) — 5 последовательных месяцев (Voskresenskaya and Marchukova, 2017). В общем виде условие для выделения событий Ла-Нинья выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{АТПО Nino3.4} &\leq -0.5^\circ\text{C} \\ \text{П} &\geq 5 \text{ мес.} \end{aligned} \quad (1)$$

Аномалии ТПО рассчитывались для всех трех массивов относительно периода с 1950 по 2019 г. с исключением сезонной изменчивости. Для того чтобы выделить сезонную изменчивость, нужно рассчитать среднемесячные значения $\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau)$ по всему временному ряду для каждого месяца:

$$\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} F(\varphi, \lambda, z_0, \tau + 12i), \quad (2)$$

где φ — широта; λ — долгота; z_0 — глубина 0 м; τ — 1, 2, ..., 12 месяцы года; n — количество лет наблюдений рассматриваемого нами временного интервала (Марчукова и др., 2020). Далее можно провести вычисления ежемесячных аномалий $\delta\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t)$ относительно полученной сезонной изменчивости:

$$\delta\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t) = F(\varphi, \lambda, z_0, \tau) - \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau). \quad (3)$$

Для классификации событий Ла-Нинья на ВТ или ЦТ типы используется метод (Yeh et al., 2009), в котором сравниваются индексы аномалий ТПО в районах Nino3 (5°N — 5°S, 150°W — 90°W) и Nino4 (5°N — 5°S, 160°E — 150°W). Это одна из самых простых методологий классификации событий Ла-Нинья, которая была применена во многих работах (Yuan and Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Diamond and Bennartz, 2015; Yu and Kim, 2013). Есть другие способы классификации, такие как разложение на эмпирические ортогональные функции (Ashok et al., 2007) или кластерный анализ (Voskresenskaya and Marchukova, 2017), которые более объективно подразделяют события на типы, но их лучше использовать на конечном этапе подтверждения получаемой классификации (Марчукова и др., 2020). Суть метода (Yeh et al., 2009) состоит в том, что если значение индекса больше по модулю в районе Nino3 в период с октября «0» года по январь «+1» года, то тип Ла-Нинья определяется как Восточно-Тихоокеанский (ВТ), а если наоборот, значение индекса больше в районе Nino4 — как Центрально-Тихоокеанский (ЦТ).

Таким образом, с 1950 по 2019 г. были выделены 11 Ла-Нинья ЦТ типа (1950–1951, 1973–1974, 1975–1976, 1983–1984, 1984–1985, 1988–1989, 1998–1999, 1999–2000, 2010–2011, 2011–2012, 2016–2017 гг.) и 8 Ла-Нинья ВТ типа (1954–1955, 1955–1956, 1964–1965, 1967–1968, 1970–1971, 1995–1996, 2007–2008, 2017–2018 гг.).

По данным о температуре и солёности океанического реанализа NCEP GODAS для двух точек, с координатами 86.5°W, 7.5°S и 159.5°W и 2.5°S, рассчитывалось среднее значение потенциальной плотности. Далее вычислялась частота Вайс-ля — Брента с помощью пакета в программе Matlab — Gibbs SeaWater Oceanographic Toolbox. Фазовая скорость низшей бароклинной моды долгопериодных экваториальных волн Россби была получена с помощью стандартной теории волн для случая, когда длина волны больше 1000 км, и определялась по следующей формуле:

$$c_n = \frac{-\beta g h_n}{f^2}, \quad (4)$$

где β — значение, описывающее изменение параметра Кориолиса с широтой; f — параметр Кориолиса; h_n — эквивалентная глубина, определяющая скорость распространения длинных бароклинных волн.

Эквивалентная глубина определялась по следующему соотношению:

$$h_n = \frac{N^2 H^2}{g n^2 \pi}, \quad (5)$$

где N — частоты Вайсяля — Брента; H — глубина океана (бралась для каждой конкретной точки из того же реанализа NCEP GODAS); n — номер моды (в данном случае $n = 1$).

Кроме этого, в данной работе был применен композитный анализ полученных среднемесячных полей концентрации хлорофилла «А», поверхностных течений, температуры воды на поверхности и по глубине с учетом статистической значимости на 95%-м уровне. Напомним, что анализ композитов основывается на выборе подмножеств данных, где ключевые моменты времени могут быть заданы на основе определенных критериев (Laken and Calogovic, 2013). В нашем случае выбраны осредненные значения вышеперечисленных гидрометеорологических характеристик по месяцам в годы разных типов Ла-Нинья. Статистическая значимость оценивалась относительно среднего климата с исключением тех лет, когда наблюдались явления ЭНЮК.

3. Полученные результаты

Распространенным фактом, является утверждение, что резкие изменения пассатных ветров — одна из причин образования межгодовых аномалий ТПО в экваториальном районе Тихого океана (Philander, 1990). Однако до сих пор причины этих изменений остаются дискуссионными. Полученные в настоящей работе расчеты демонстрируют увеличение обратной линейной связи между временными рядами индексов пассатных ветров и индексом Nino3.4, если их коррелировать со сдвигом на три месяца (табл. 1). Исключением является лишь Западно-Тихоокеанский пассатный регион. Это подтверждает важную роль пассатов в формировании отрицательных аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана в годы Ла-Нинья (Philander, 1990). При этом, если рассматривать особенности изменения пассатных

Таблица 1. Корреляция между индексами TW и Nino3.4

Индекс	Без сдвига	Сдвиг на 3 мес.
Западный пассат	-0.67	-0.59
Центральный пассат	-0.67	-0.80
Восточный пассат	-0.37	-0.51

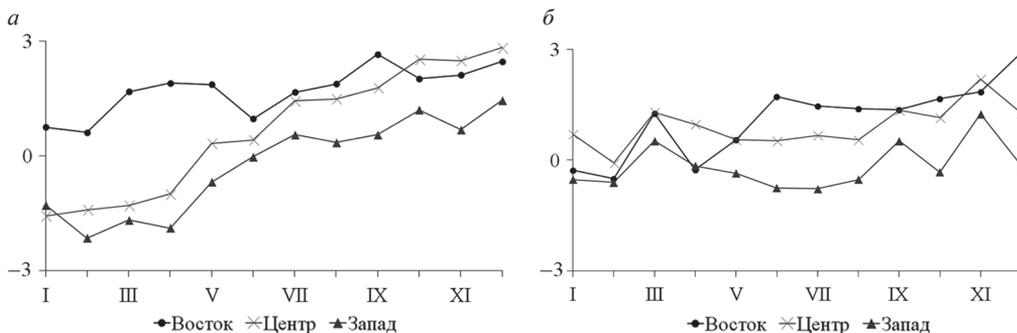


Рис. 2. Композиты изменения индексов пассатных ветров (показаны на оси абсцисс) в «0 год» для трех событий Ла-Нинья ВТ типа (а) и для восьми событий Ла-Нинья ЦТ (б)

индексов, соответствующих разным типам Ла-Нинья, то получается, что ВТ тип характеризуется усилением восточного экваториального пассата (рис. 2, а), в то время как ЦТ тип — усилением центрально-тихоокеанских ветров (рис. 2, б), что подтверждает результаты предыдущей работы (Марчукова и др., 2018). Однако это до конца не объясняет физические особенности образования двух типов Ла-Нинья.

Композитные карты аномалий ТПО и поверхностных течений с июня по октябрь «0» года для двух типов Ла-Нинья с 1981 по 2019 г. по данным NCEP GODAS продемонстрированы на рис. 3. На этих картах видно, что при ЦТ типе Ла-Нинья отрицательная аномалия ТПО зарождается и активно формируется уже в июне в центрально-экваториальной зоне Тихого океана. Поверхностные течения в летний период возле этих аномалий расходятся. Совсем иная картина наблюдается в период ВТ типа Ла-Нинья — отрицательные аномалии ТПО начинают формироваться в восточно-экваториальном районе Тихого океана к концу августа «0» года, при этом расхождения течений в экваториально-центральной части не отмечаются. Композитный анализ пространственно-временных распределений аномалий ТПО и поверхностных течений за 38 лет дает основание предположить, что в годы ЦТ типа Ла-Нинья отрицательная аномалия ТПО, вероятно, образуется за счет формирования центрально-экваториального апвеллинга, поднимающего из глубин океана к поверхности более холодные, обогащенные биогенами воды. Для доказательства предложенного вывода к работе был привлечен анализ среднемесячных данных о концентрации хлорофилла «А» с 1998 по 2019 г. и значения температуры воды по глубине от 5 до 4000 м с 1981 по 2019 г.

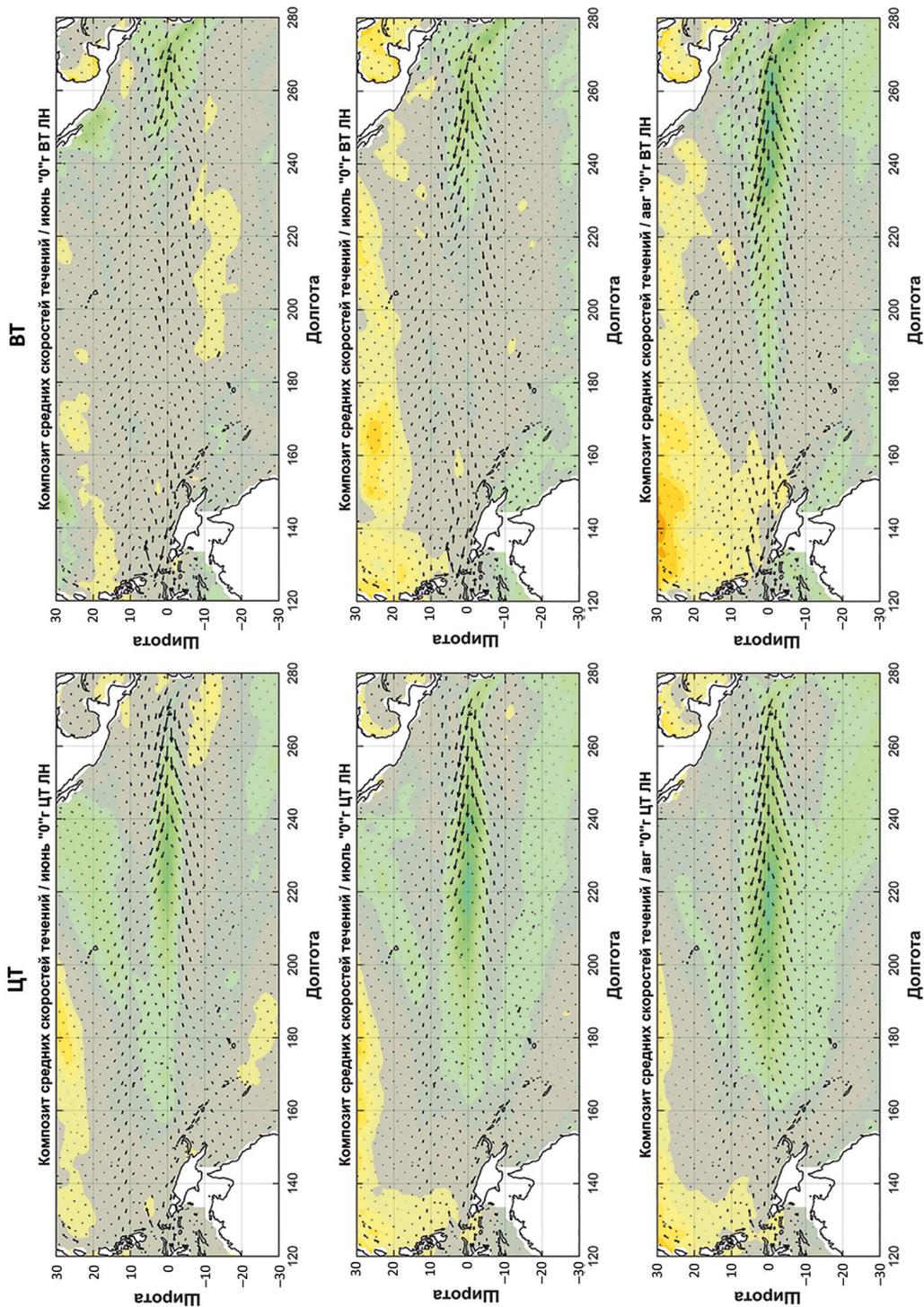
В первую очередь были исследованы пространственные карты по спутниковым данным SeaWiFS о среднемесячных изменениях концентрации хлорофилла «А» с 1998 по 2010 г. В этот период зарегистрировано всего одно событие Ла-Нинья ВТ типа (в 2007 г.) и два события ЦТ типа (в 1998–1999 и 2010 гг.). По двум представленным случаям ЦТ Ла-Нинья обнаружено, что летом, в начальной стадии зарождения отрицательной аномалии ТПО, среднемесячная концентрация хлорофилла «А» в районе центрально-экваториальной части Тихого океана увеличивается почти в шесть раз — с 0.1 до 0.6 мг/м³ (карты не представлены). Это свидетельствует о поднятии глубинных холодных вод, обогащенных биогенами, на поверхность, то есть об образовании центрально-экваториального апвеллинга. При ВТ типе такого

увеличения концентрации хлорофилла в 2007 г. не наблюдалось в центре Тихого океана, но было зафиксировано в районе Перуанского апвеллинга. Это также хорошо прослеживается на глубинных картах изменения среднемесячных значений температуры воды для этих же единичных примеров Ла-Нинья (карты не представлены). Летом 2007 г. (ВТ тип Ла-Нинья) термоклин был приподнят к поверхности у берегов Южной Америки от 120 до 90°W, а летом 1998 г. (ЦТ тип Ла-Нинья) термоклин был поднят к поверхности в районе 150–120°W.

Если рассматривать ежемесячные композиты температуры воды в вертикальном разрезе по глубине экваториальной полосы Тихого океана (рис. 4) с 1981 по 2019 г. для четырех событий ВТ и восьми событий ЦТ типов Ла-Нинья, то значимые изменения на 95 %-м уровне характерны только для центрального типа Ла-Нинья в летний период в толще воды до 250 м. На рис. 4, а, в, д можно видеть, что термоклин в центрально-экваториальной зоне Тихого океана более приподнят вверх (50–75 м), по сравнению с восточным типом (100–150 м). В годы ВТ типа Ла-Нинья значимых подъемов глубинных вод в центрально-экваториальной части не обнаружено (рис. 4, б, з). Однако получены значимые изменения температуры воды в толще до 50 м в районе восточно-экваториальной части Тихого океана в октябре (рис. 4, е).

Данные GLOB COLOR позволили получить композиты среднемесячных изменений концентрации хлорофилла «А» для двух типов Ла-Нинья с учетом их статистической значимости на 95%-м уровне. Как и предполагалось, в годы ЦТ типа Ла-Нинья наблюдается значимое увеличение концентрации хлорофилла до 0.8 мг/м³ в центрально-экваториальной части Тихого океана в летний период (рис. 5). Это еще раз доказывает, что физическим объяснением образования ЦТ типа Ла-Нинья является заблаговременное формирование центрально-экваториального апвеллинга.

Информация о том, что во время Ла-Нинья биологическая продуктивность океана увеличивается, была отмечена еще в работах (Riascos et al., 2008; Feingold, 2011), но не только за счет понижения температуры воды, как это принято считать, а также за счет увеличения вертикальных движений воды, вызванных усилением долгопериодных ЭВР (Yu and Liu 2003; Бондаренко и Серых, 2011). Рассмотрим изменение аномалий фазовых скоростей волн Россби с применением трехмесячной фильтрации в двух точках: в зоне Перуанского апвеллинга, соответствующего ВТ типу Ла-Нинья (точка № 1, 86.5°W и 7.5°S), и центрально-экваториальной зоне, соответствующей ЦТ типу Ла-Нинья (точка № 2, 159.5°W и 2.5°S). Из анализа рис. 6 следует, что в периоды Эль-Ниньо наблюдаются аномальное снижение фазовых скоростей ЭВР (с учетом трехмесячной фильтрации аномалия $sn \approx -7 \dots -10$ см/с), а во время Ла-Нинья, наоборот, происходит усиление ЭВР (аномалия $sn \approx 2 \dots 4$ см/с). Эти результаты согласуются с выводами других авторов (Yu and Liu 2003; An, 2008; Zhang, 2016 и др.). Если рассматривать изменение аномалий фазовых скоростей ЭВР по двум типам исследуемых холодных эпизодов ЭНЮК, то после анализа рис. 6 можно сделать вывод, что при ЦТ Ла-Нинья аномалии фазовых скоростей волн Россби более выражены в точке № 2, с координатами 159.5°W и 2.5°S, чем в точке № 1, с координатами 86.5°W и 7.5°S. Однако если более детально изучить изменение характеристик ЭВР в точке № 2 в периоды последовательных ЦТ типов Ла-Нинья, таких как 1983–1984 и 1984–1985,



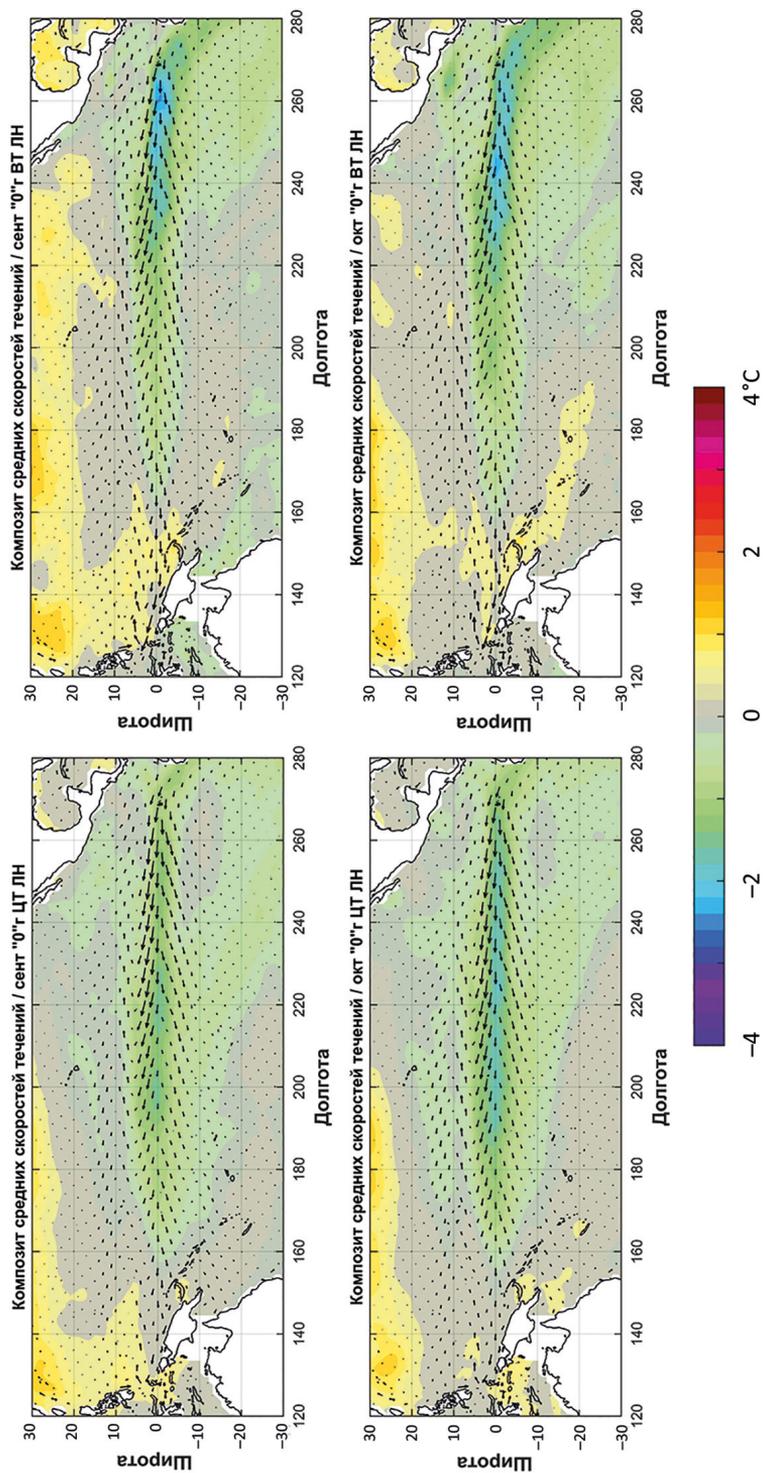
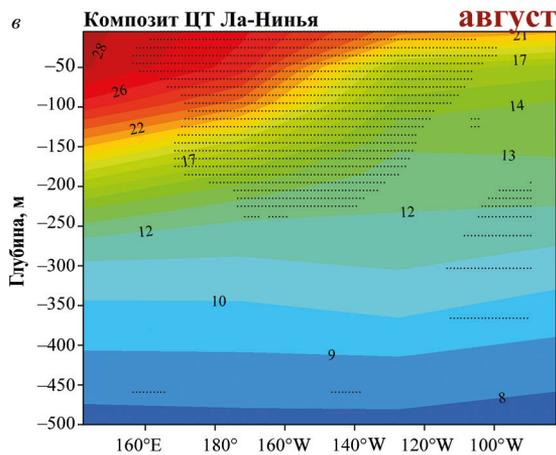
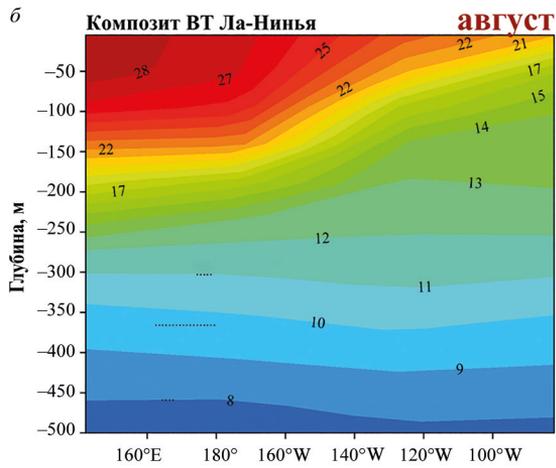
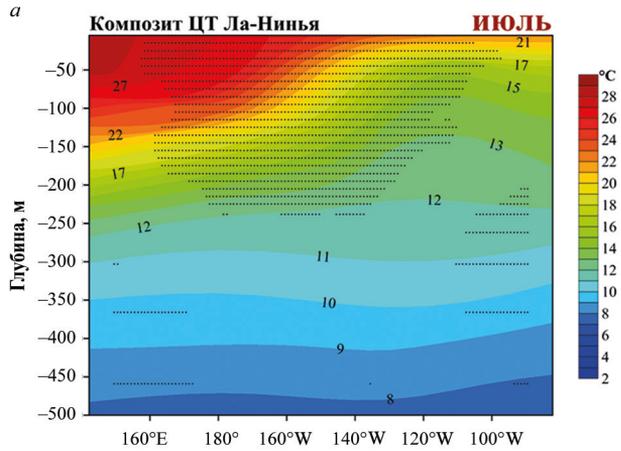


Рис. 3. Композиты среднемесячных значений скорости и направления течений на глубине 5 м и аномалии ТПО для 9 событий Ла-Нинья ЦТ типа и 4 ВТ типа Ла-Нинья по данным океанического реанализа NCEP-GODAS с 1980 по 2017 г.



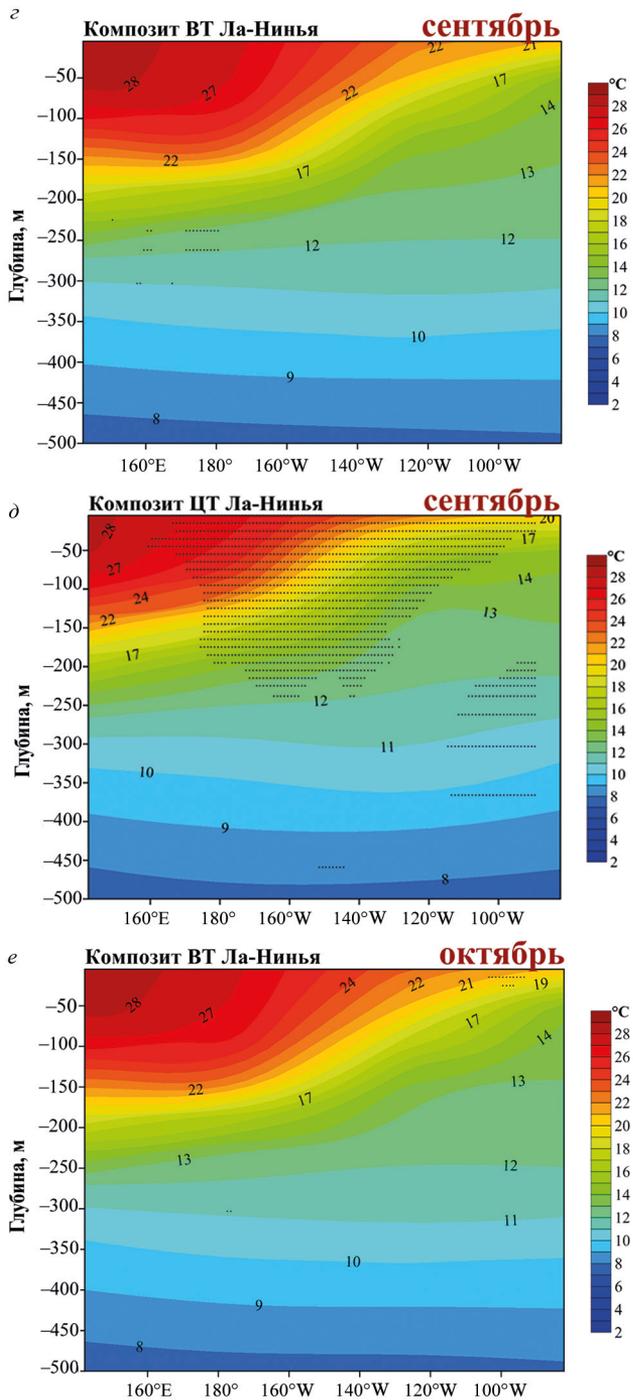


Рис. 4. Композиты изменения среднемесячной температуры по глубине в разрезе на экваторе (0°) от 150°E до 90°W по данным океанического реанализа NCEP_GODAS для ВТ (4 события) и ЦТ (8 событий) типов Ла-Нинья. Точками обозначена статистическая значимость на 95%-м уровне

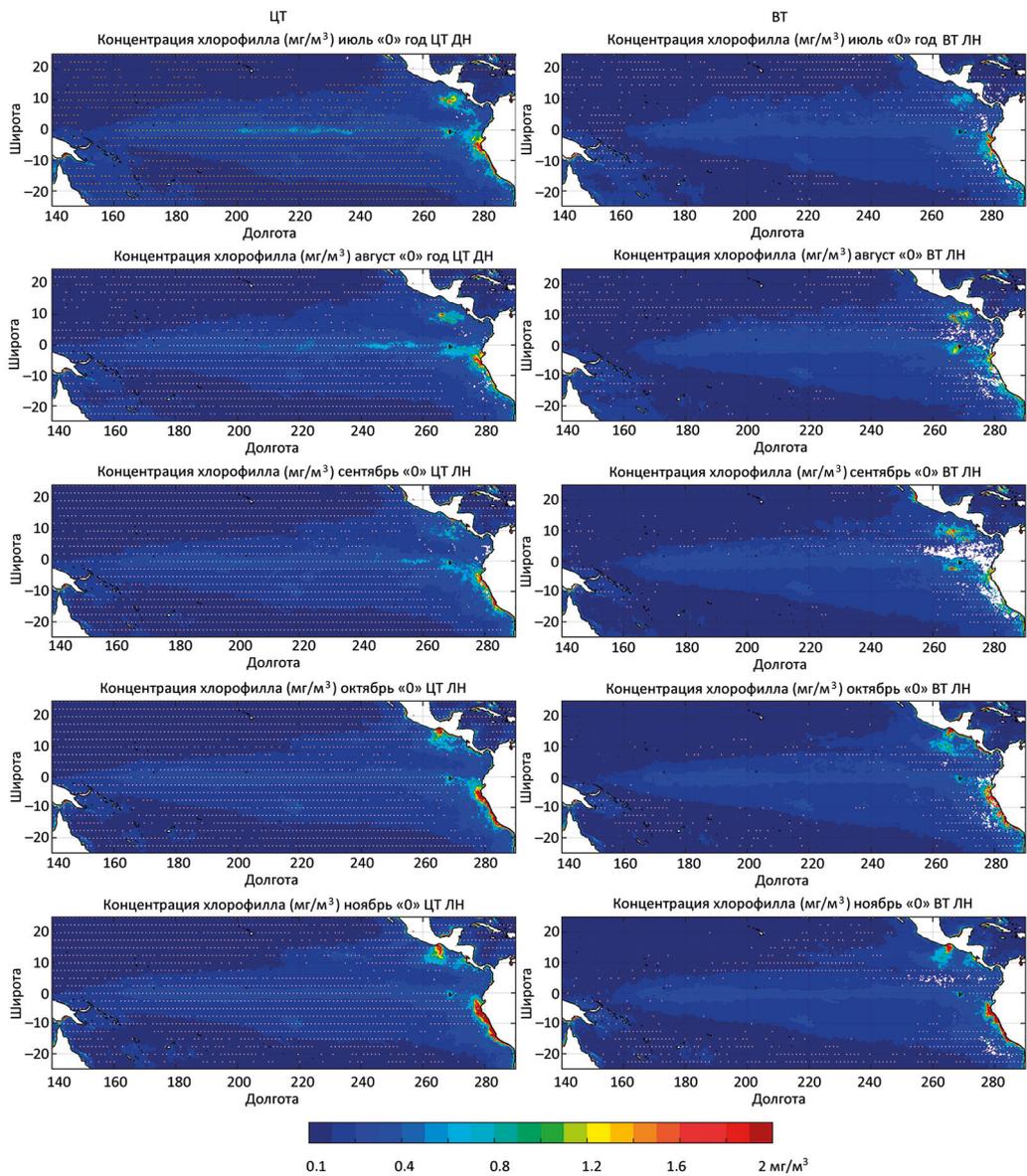


Рис. 5. Композиты пространственного изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла по спутниковым данным проекта GLOB COLOR для ВТ (3 события) и ЦТ (5 событий) типов Ла-Нинья. Белыми точками обозначена статистическая значимость на 95%-м уровне

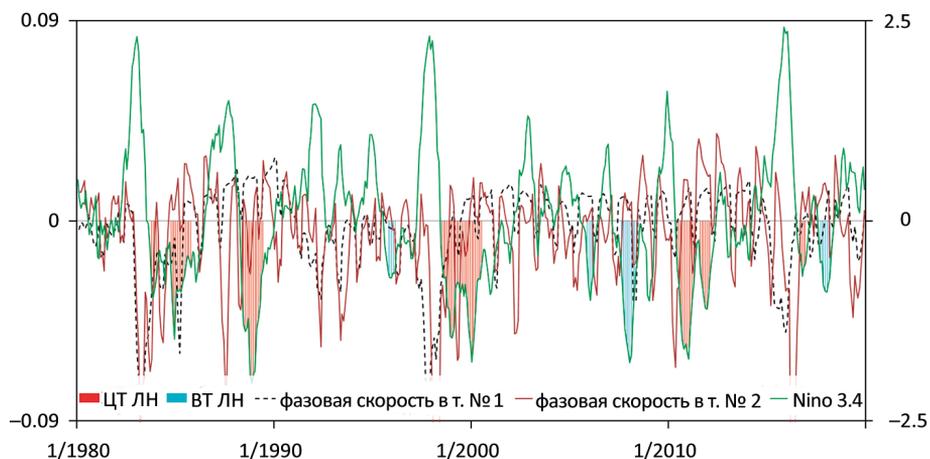


Рис. 6. Временной ход индекса Nino3.4 ($^{\circ}\text{C}$) по данным HadISST и аномалий фазовых скоростей экваториальных волн Россби (м/сек) по данным NCEP/GODAS с применением трехмесячной фильтрации в т. № 1, с координатами 86.5°W , 7.5°S , и в т. № 2, с координатами 159.5°W , 2.5°S . Гистограммами отмечены периоды событий ВТ (голубая заливка) и ЦТ (красная заливка) типов Ла-Нинья

1998–1999 и 1999–2000, 2010–2011 и 2011–2012 гг., то заметно, как между этими событиями присутствует отрицательная аномалия фазовой скорости волн Россби. Это как раз свидетельствует об увеличении концентрации хлорофилла «А» из-за образовавшегося центрально-экваториального апвеллинга. В работе (Tian et al., 2019) был получен вывод, что увеличение концентрации хлорофилла приводит к ослаблению самих ЭВР из-за модуляции солнечной радиации в верхних слоях океана.

Ослабление ЭВР способствует уменьшению меридионального переноса тепла на экватор, что, в свою очередь, уменьшает прогревание отрицательной аномалии ТПО в восточно-экваториальной части Тихого океана. В результате образуется второе событие Ла-Нинья, немного смещенное на восток, но с максимальной холодной аномалией в центре, вследствие чего фазовая скорость ЭВР снова увеличивается (рис. 6). При ВТ типе Ла-Нинья положительные аномалии фазовых скоростей волн Россби в точке № 2 в два раза меньше, чем при ЦТ типе. Это еще раз подтверждает один из основных выводов данной работы, что при ВТ типе Ла-Нинья центрально-экваториальный апвеллинг не образуется.

4. Выводы

В настоящей работе описаны особенности образования двух типов Ла-Нинья, Восточно-Тихоокеанского и Центрально-Тихоокеанского, с использованием композитного анализа среднемесячных полей концентрации хлорофилла «А» с 1998 по 2019 г. по спутниковым данным проекта GlobColour, поверхностных течений, температуры воды на поверхности и на глубине до 500 м из океанического реанализа NCEP GODAS с 1981 по 2019 г. Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы.

1. События Ла-Нинья ЦТ типа, как правило, зарождаются в апреле или мае в центре экваториальной зоны Тихого океана. Максимальная фаза их развития приходится на ноябрь — январь с «0» по «+1» год. Важную роль при этом играет интенсификация центрально-экваториальных пассатных ветров. Летом, в начальной стадии развития явления, в центрально-экваториальной зоне формируется интенсивный апвеллинг, при котором концентрация хлорофилла «А» увеличивается в 6–8 раз (с 0.1 до 0.8 мг/м³), а термоклин в экваториальной зоне между 170–100°W поднимается до глубины 50 м. Этот центрально-экваториальный апвеллинг, вызванный усилением пассатных ветров и, как следствие, усилением экваториальных волн Россби, обуславливает образование отрицательной аномалии ТПО и способствует формированию ЦТ типа Ла-Нинья.

2. Ла-Нинья ВТ типа возникают в апреле и всегда на востоке экваториальной зоны Тихого океана. Максимальная фаза развития таких событий выпадает на октябрь — декабрь «0» года. При ВТ типе Ла-Нинья центрально-экваториальный апвеллинг не образуется, что подтверждается отсутствием выраженных положительных аномалий фазовых скоростей волн Россби и повышенной концентрацией хлорофилла «А» на экваторе в центре Тихого океана. Отрицательная аномалия ТПО формируется за счет усиления Перуанского апвеллинга, поддерживаемого интенсификацией пассатных ветров над восточно-экваториальным сектором Тихого океана.

Литература

- Бондаренко, А. Л., Серых, И. В. (2011). О формировании явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья Тихого океана. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса*, 8 (2), 57–63.
- Марчукова, О. В., Воскресенская, Е. Н., Лубков, А. С. (2018). К вопросу о физическом механизме формирования двух типов Ла-Нинья. *Процессы в геосферах*, 3 (17), 267–268.
- Марчукова, О. В., Лубков, А. С., Воскресенская, Е. Н. (2020). Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*, 1 (1), 97–120. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.106>
- An, S.-I. (2008). Interannual variations of the tropical ocean instability wave and ENSO. *Journal of Climate*, 21 (15), 3680–3686. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1701.1>
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H. and Yamagata T. (2007). El Nino Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Baturin, N. G. and Niiler, P. P. (1997). Effects of instability waves in the mixed layer of the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C13), 27771–27793. <https://doi.org/10.1029/97JC02455>
- Cai, W. and Cowan, T. (2009). La Nina Modoki impacts Australia autumn rainfall variability. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12805. <https://doi.org/10.1029/2009GL037885>
- Chang, C. P., Zhang, Y. S. and Li, T. (2000). Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J. Climate*, 13, 4326–4340. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C4326:IAIVOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C4326:IAIVOT%3E2.0.CO;2)
- Chen, S. F., Chen, W. and Wei, K. (2013). Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO. *Adv. Atmos. Sci.*, 30, 1712–1724. <https://doi.org/10.1007/s00376-013-2296-8>
- Contreras, R. F. (2002). Long-term observations of tropical instability waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 2715–2722. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<2715:LTOOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<2715:LTOOTI>2.0.CO;2)
- Сpc.ncep.noaa.gov (2020). National weather service — Monthly atmospheric and SST Indices. [online] Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> [Accessed 10 Feb. 2020].

- Cracknell, A. P., Newcombe, S. K., Black, A. F. and Kirby, N. E. (2001). The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) Concerted Action. *Int. Journal of Remote Sensing*, 22, 205–247. <https://doi.org/10.1080/014311601449916>
- Diamond, M. S. and Bennartz, R. (2015). Occurrence and trends of eastern and central Pacific El Niño in different reconstructed SST data sets. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 375–381. <https://doi.org/10.1002/2015GL066469>
- Ding, S., Chen, W., Feng, J. and Graf, H.-F. (2017). Combined Impacts of PDO and Two Types of La Niña on Climate Anomalies in Europe. *Journal of Climate*, 30, 3253–3278. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0376.1>
- Feingold, J. S. (2011) El Niño, La Niña, and ENSO. In: D. Hopley, ed., *Encyclopedia of Modern Coral Reefs. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. 365–368. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2639-2_74
- Feng, L. C., Zhang R.-H., Yu B. and Han X. (2020). Roles of wind stress and subsurface cold water in the second-year cooling of the 2017/18 La Niña event. *Adv. Atmos. Sci.*, 37, 847–860. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0028-4>
- Graham, T. (2014). The importance of eddy permitting model resolution for simulation of the heat budget of tropical instability waves. *Ocean Modelling*, 79, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.04.005>
- Hermes.acri.fr (2021). The GlobColour Project. [online] Available at: <https://hermes.acri.fr/index.php?class=archive/> [Accessed 27 Feb. 2020].
- Hirahara, S., Ishii, M. and Fukuda, Y. (2014). Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *Journal of Climate*, 27, 57–75. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00837.1>
- Laken, B. and Calogovic, J. (2013). Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds. *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A29. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013051>
- Legeckis, R. (1977). Long waves in the eastern equatorial Pacific Ocean: A view from a geostationary satellite. *Science*, 197, 1179–1181. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.197.4309.1179>
- Manuel, J. (2008). Drought in the Southeast: Lessons for water management. *Environ Health Perspect*, 116, A168–A171. <https://doi.org/10.1289/ehp.116-a168>
- Maritorena, S., Hembise Fanton d'Andon, O., Mangin, A. and Siegel, D. A. (2010). Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1791–1804. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.002>
- Menkes, C. E. R., Vialard, J. G., Kennan, S. C., Boulanger, J.-P. and Madec, G. V. (2006). A modeling study of the impact of tropical instability waves on the heat budget of the eastern equatorial Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 36 (5), 847–865. <https://doi.org/10.1175/JPO2904.1>
- Miller, J. (2019). *La Niña and the Making of Climate Optimism*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76141-1>
- Philander, S. G. (1990). *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA. <https://doi.org/10.1126/science.248.4957.904>
- Picaut, J., Hackert, E., Busalacchi, A. J., Murtugudde, R. and Lagerloef, G. (2002). Mechanisms of the 1997–1998 El Niño–La Niña, as inferred from space-based observations. *J. Geophys. Res.*, 107, 3037. <https://doi.org/10.1029/2001JC000850>
- PsL.noaa.gov (2021). NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) — NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). [online] Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.godas.html/> [Accessed 27 Dec. 2021].
- Qiao, L. and Weisberg, R. H. (1995). Tropical instability wave kinematics: Observations from the tropical instability wave experiment. *J. Geophys. Res.*, 100, 8677–8693 <https://doi.org/10.1029/95JC00305>
- Rasmusson, E. M. and Carpenter, T. H. (1982). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110%3C0354:VITSST%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110%3C0354:VITSST%3E2.0.CO;2)
- Riascos, J. M., Heilmayer, O. and Laudien, J. (2008). Population dynamics of the tropical bivalve *Cardita affinis* from Málaga Bay, Colombian Pacific related to La Niña 1999–2000. *Helgol. Mar. Res.*, 62, 63–71. <https://doi.org/10.1007/s10152-007-0083-6>
- Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J., Wang, W., Zhang, Q., Van Den Dool, H. M., Pan, H.-L., Moorthi, S., Behringer, D., Stokes, D., Pena, M., Lord, S., White, G., Ebisuzaki, W., Peng, P. and Xie, P. (2006). The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, 19, 3483–3517. <https://doi.org/10.1175/JCLI3812.1>

- Shinoda, T., Hurlburt, H. E. and Metzger, E. J. (2013) Anomalous tropical ocean circulation associated with La Nina Modoki. *J. Geophys. Res.*, 116, C12001. <https://doi.org/10.1029/2011JC007304>
- Tian, F., Zhang, R.-H. and Wang, X. (2019). A positive feedback onto ENSO due to tropical instability wave (TIW)-induced chlorophyll effects in the Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 889–897. <https://doi.org/10.1029/2018GL081275>
- Voskresenskaya, E. N. and Marchukova, O. V. (2017). Spatial classification of La Nina events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, 111–119. <https://doi.org/10.1134/S0001433817010133>
- Webster, P. J., Magaña V. O., Palmer T. N., Shukla, J., Tomas, R. A., Yanai, M. and Yasunari, T. (1998). Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res. Oceans*, 103, 14451–14510. <https://doi.org/10.1029/97JC02719>
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P. and Jin F.-F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*, 461, 511–514. <https://doi.org/10.1038/nature08316>
- Yu, J.-Y. and Liu, W. T. (2003). A linear relationship between ENSO intensity and tropical instability wave activity in the eastern Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1735. <https://doi.org/10.1029/2003GL017176>
- Yu, J.-Y. and Kim, S. T. (2013). Identifying the Types of Major El Niño Events since 1870. *Int. Journal of Climatology*, 33, 2105–2112. <https://doi.org/10.1002/joc.3575>
- Yuan, Y. and Yan, H. M. (2013). Different types of La Nina events and different responses of the tropical atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 58, 406–415. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>
- Zhang, R.-H. (2016). A modulating effect of tropical instability wave (TIW)-induced surface wind feedback in a hybrid coupled model of the tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 7326–7353. <https://doi.org/10.1002/2015JC011567>
- Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L. and He, J. (2014). Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. *Climate Dynamics*, 44, 1351–1366. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z>

Статья поступила в редакцию 8 июня 2021 г.
Статья рекомендована к печати 18 апреля 2022 г.

Контактная информация:

Марчукова Олеся Владимировна — olesjath@mail.ru
Воскресенская Елена Николаевна — elena_voskr@mail.ru

Features of the formation of the Central and East Pacific La Niña types*

O. V. Marchukova, E. N. Voskresenskaya

Institute of Natural and Technical Systems,
28, pr. Lenina, Sevastopol, 299011, Russian Federation

For citation: Marchukova, O. V., Voskresenskaya, E. N. (2022). Features of the formation of the Central and East Pacific La Niña types. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (2), 299–317. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.205> (In Russian)

This paper analyzes dataset of global ocean chlorophyll A (Chl a) concentration from the GlobColour project over the equatorial Pacific during the La Niña events from 1998 to 2018. GlobColour includes satellite sensors such as SeaWiFS, MODIS, MERIS and others. The study of changes in chlorophyll A concentration is carried out with an analysis of sea temperature and current distributions on the surface and over the ocean depth taken from the NCEP GO-

* The study was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. 0012-2021-0007 (121122300072-3) “Fundamental and applied research on the patterns and mechanisms of formation of regional changes in the natural environment and climate under the influence of global processes in the ocean-atmosphere system and anthropogenic impact”.

DAS reanalysis from 1981 to 2018. Additionally the trade wind indices from 1979 to 2018 are used. The purpose of the work is to study the mechanisms of formation of two La Niña types, leading to the occurrence of different climatic anomalies in different regions of our planet. It is found that at the initial stage of the Central Pacific La Niña type origin the ocean chlorophyll A concentration over the center equatorial Pacific increases in six to eight times (from 0.1 mg/m³ to 0.8 mg/m³) and the thermocline depth in this area decreases to 50 m indicating the intensification of the central equatorial upwelling. During the East Pacific La Niña type the central equatorial upwelling is not formed and negative sea surface temperature anomalies are formed by increasing of the Peruvian upwelling supported intensification trade winds on the East Pacific equatorial sector. All obtained results are confirmed by a 95 % statistically significant by Student's test. Thus, the work is demonstrated significant differences in the features of the two La Niña types formation at their initial stage of origin.

Keywords: La Niña types, chlorophyll concentration, sea surface temperature anomaly, thermocline, Pacific Ocean, trade winds, surface currents.

References

- An, S.-I. (2008). Interannual variations of the tropical ocean instability wave and ENSO. *Journal of Climate*, 21 (15), 3680–3686. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1701.1>
- Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Wang, H. and Yamagata T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Baturin, N. G. and Niiler, P.P. (1997). Effects of instability waves in the mixed layer of the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 102 (C13), 27771–27793. <https://doi.org/10.1029/97JC02455>
- Bondarenko, A. L. and Serykh, I. V. (2011). About formation of the phenomenon the El Niño — La Niña of Pacific ocean. *Sovr. Probl. DZZ Kosm.*, 8 (2), 57–63. (In Russian).
- Cai, W. and Cowan, T. (2009). La Niña Modoki impacts Australia autumn rainfall variability. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L12805. <https://doi.org/10.1029/2009GL037885>
- Chang, C.P., Zhang, Y.S. and Li, T. (2000). Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J. Climate*, 13, 4326–4340. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C4326:IAIVOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C4326:IAIVOT%3E2.0.CO;2)
- Chen, S.F., Chen, W. and Wei, K. (2013). Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic Oscillation and ENSO. *Adv. Atmos. Sci.*, 30, 1712–1724. <https://doi.org/10.1007/s00376-013-2296-8>
- Contreras, R.F. (2002). Long-term observations of tropical instability waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 2715–2722. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<2715:LTOOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<2715:LTOOTI>2.0.CO;2)
- Cpc.ncep.noaa.gov (2020). National weather service — Monthly atmospheric and SST Indices. [online] Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> [Accessed 10 Feb. 2020].
- Cracknell, A.P., Newcombe, S.K., Black, A.F. and Kirby, N.E. (2001). The ABDMAP (Algal Bloom Detection, Monitoring and Prediction) Concerted Action. *Int. Journal of Remote Sensing*, 22, 205–247. <https://doi.org/10.1080/014311601449916>
- Diamond, M.S. and Bennartz, R. (2015). Occurrence and trends of eastern and central Pacific El Niño in different reconstructed SST data sets. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 375–381. <https://doi.org/10.1002/2015GL066469>
- Ding, S., Chen, W., Feng, J. and Graf, H.-F. (2017). Combined Impacts of PDO and Two Types of La Niña on Climate Anomalies in Europe. *Journal of Climate*, 30, 3253–3278. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0376.1>
- Feingold, J.S. (2011) El Niño, La Niña, and ENSO. In: D. Hopley ed., *Encyclopedia of Modern Coral Reefs. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht. 365–368. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2639-2_74
- Feng, L. C., Zhang R.-H., Yu B. and Han X. (2020). Roles of wind stress and subsurface cold water in the second-year cooling of the 2017/18 La Niña event. *Adv. Atmos. Sci.*, 37, 847–860. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0028-4>
- Graham, T. (2014). The importance of eddy permitting model resolution for simulation of the heat budget of tropical instability waves. *Ocean Modelling*, 79, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.04.005>

- Hermes.acri.fr (2021). The GlobColour Project. [online] Available at: <https://hermes.acri.fr/index.php?class=archive/> [Accessed 27 Feb. 2020].
- Hirahara, S., Ishii, M. and Fukuda, Y. (2014). Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *Journal of Climate*, 27, 57–75. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00837.1>
- Laken, B. and Calogovic, J. (2013). Composite analysis with Monte Carlo methods: an example with cosmic rays and clouds. *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A29. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013051>
- Legeckis, R. (1977). Long waves in the eastern equatorial Pacific Ocean: A view from a geostationary satellite. *Science*, 197, 1179–1181. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.197.4309.1179>
- Manuel, J. (2008). Drought in the Southeast: Lessons for water management. *Environ Health Perspect*, 116, A168–A171. <https://doi.org/10.1289/ehp.116-a168>
- Marchukova, O. V., Lubkov, A. S., Voskresenskaya, E. N., The quality of the reproduction of El Niño and La Niña events using different reconstructed sea surface temperature data sets. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 1 (1), 97–120. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.106> (In Russian)
- Marchukova, O. V., Voskresenskaya, E. N. and Lubkov, A. S. (2018). Revisiting the physical mechanism of two La Niña types. *Processes in GeoMedia*, 3 (17), 267–268. (In Russian)
- Maritorena, S., Hembise Fanton d'Andon, O., Mangin, A. and Siegel, D. A. (2010). Merged satellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1791–1804. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.002>
- Menkes, C. E. R., Vialard, J. G., Kennan, S. C., Boulanger, J.-P. and Madec, G. V. (2006). A modeling study of the impact of tropical instability waves on the heat budget of the eastern equatorial Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 36 (5), 847–865. <https://doi.org/10.1175/JPO2904.1>
- Miller, J. (2019). *La Niña and the Making of Climate Optimism*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76141-1>
- Philander, S. G. (1990). *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, CA. <https://doi.org/10.1126/science.248.4957.904>
- Picaut, J., Hackert, E., Busalacchi, A. J., Murtugudde, R. and Lagerloef, G. (2002). Mechanisms of the 1997–1998 El Niño–La Niña, as inferred from space-based observations. *J. Geophys. Res.*, 107, 3037. <https://doi.org/10.1029/2001JC000850>
- Psl.noaa.gov (2021). NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) — NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS). [online] Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.godas.html/> [Accessed 27 Dec. 2021].
- Qiao, L. and Weisberg, R. H. (1995). Tropical instability wave kinematics: Observations from the tropical instability wave experiment. *J. Geophys. Res.*, 100, 8677–8693 <https://doi.org/10.1029/95JC00305>
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C. and Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D14), 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Rasmusson, E. M. and Carpenter, T. H. (1982). Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 354–384. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110%3C0354:VITSSST%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110%3C0354:VITSSST%3E2.0.CO;2)
- Riascos, J. M., Heilmayer, O. and Laudien, J. (2008). Population dynamics of the tropical bivalve *Cardita affinis* from Málaga Bay, Colombian Pacific related to La Niña 1999–2000. *Helgol. Mar. Res.*, 62, 63–71. <https://doi.org/10.1007/s10152-007-0083-6>
- Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J., Wang, W., Zhang, Q., Van Den Dool, H. M., Pan, H.-L., Moorthi, S., Behringer, D., Stokes, D., Pena, M., Lord, S., White, G., Ebisuzaki, W., Peng, P. and Xie, P. (2006). The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, 19, 3483–3517. <https://doi.org/10.1175/JCLI3812.1>
- Shinoda, T., Hurlburt, H. E. and Metzger, E. J. (2013). Anomalous tropical ocean circulation associated with La Niña Modoki. *J. Geophys. Res.*, 116, C12001. <https://doi.org/10.1029/2011JC007304>
- Tian, F., Zhang, R.-H. and Wang, X. (2019). A positive feedback onto ENSO due to tropical instability wave (TIW)-induced chlorophyll effects in the Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 889–897. <https://doi.org/10.1029/2018GL081275>
- Voskresenskaya, E. N. and Marchukova, O. V. (2017). Spatial classification of La Niña events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 53, 111–119. <https://doi.org/10.1134/S0001433817010133>

- Webster, P. J., Magaña V. O., Palmer T. N., Shukla, J., Tomas, R. A., Yanai, M. and Yasunari, T. (1998). Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res. Oceans*, 103, 14451–14510. <https://doi.org/10.1029/97JC02719>
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P. and Jin F.-F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*, 461, 511–514. <https://doi.org/10.1038/nature08316>
- Yu, J.-Y. and Kim, S. T. (2013). Identifying the Types of Major El Niño Events since 1870. *Int. Journal of Climatology*, 33, 2105–2112. <https://doi.org/10.1002/joc.3575>
- Yu, J.-Y. and Liu, W. T. (2003). A linear relationship between ENSO intensity and tropical instability wave activity in the eastern Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1735. <https://doi.org/10.1029/2003GL017176>
- Yuan, Y. and Yan, H. M. (2013). Different types of La Nina events and different responses of the tropical atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 58, 406–415. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>
- Zhang, R.-H. (2016). A modulating effect of tropical instability wave (TIW)-induced surface wind feedback in a hybrid coupled model of the tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 7326–7353. <https://doi.org/10.1002/2015JC011567>
- Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L. and He, J. (2014). Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. *Climate Dynamics*, 44, 1351–1366. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z>

Received: June 8, 2021

Accepted: April 18, 2022

Contact information:

Olesia V. Marchukova — olesjath@mail.ru

Elena N. Voskresenskaya — elena_voskr@mail.ru